

典型黄绵土团聚体稳定性变化对植被演替的响应^①

郭正¹, 张凤宝^{1, 2*}, 黄悦¹, 李玄添¹, 李潼亮¹, 申楠^{1, 2}, 杨明义^{1, 2}, 李舒畅¹

(1 西北农林科技大学水土保持科学与工程学院黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100; 2 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

摘要: 本文选取黄土高原子午岭林区 4 种植被演替阶段(草地、沙棘、山杨和辽东栎)的土壤作为研究对象, 以农田土壤为对照, 采用高能水分特性法测定不同植被演替阶段下的土壤团聚体稳定性, 探究其变化特征以及响应因子。结果表明: 表层(0~15 cm)土壤团聚体稳定性指数(SR)表现为草地(0.43)<农田(0.46)<沙棘(0.49)<山杨(0.59)<辽东栎(0.70), 亚表层(15~30 cm)土壤 SR 则表现为农田(0.36)<草地(0.46)<辽东栎(0.52)<沙棘(0.65)<山杨(0.68)。整体上随着植被的正向演替, 土壤团聚体稳定性不断增强, 表层土壤团聚体稳定性不完全高于亚表层。除土壤有机碳外, 团聚体稳定性与土壤粒径组成的关系同样密切, 其中有效砂粒为土壤团聚体稳定性最主要的响应因子。

关键词: 土壤团聚体; 植被演替; 团聚体稳定性; 高能水分特性法

中图分类号: S152.4 文献标志码: A

Response of Soil Aggregate Stability Changes of Typical Huangmian Soil to Vegetation Succession

GUO Zheng¹, ZHANG Fengbao^{1, 2*}, HUANG Yue¹, LI Xuantian¹, LI Tongliang¹, SHEN Nan^{1, 2}, YANG Mingyi^{1, 2}, LI Shuchang¹
(1 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, College of Water and Soil Conservation Science and Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2 Institute of Water and Soil Conservation, The Ministry of Water Resources, Chinese Academy of Sciences, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In this study, soils at four stages of vegetation succession (grassland, seabuckthorn, poplar and Liaodong oak) in the Ziwuling forest region of the Loess Plateau were selected as the research object, with the farmland soil as the control (CK). The high energy moisture characteristic (HEMC) method was used to determine soil aggregate stabilities under different vegetation succession stages, and explore the change characteristics and response factors. The results showed that surface (0–15 cm) aggregate stability index (SR) showed grassland (0.43)<farmland (0.46)<seabuckthorn (0.49)<poplar (0.59)<Liaodong oak (0.70), while subsurface soil (15–30 cm) SR was farmland (0.36)<grassland (0.46)<Liaodong oak (0.52)<seabuckthorn (0.65)<poplar (0.68). On the whole, with the vegetation succession, the stability of soil aggregate was constantly enhanced, and the stability of surface soil aggregate was not completely higher than that of subsurface. Besides soil organic carbon, aggregate stability was equally closely related to soil particle size composition, with effective sand grains serving as the most important response factor for soil aggregate stability.

Key words: Soil aggregate; Vegetation succession; Aggregate stability; High energy moisture characteristic (HEMC)

土壤质量是保障土壤生态安全的重要指标, 其演变过程和可持续发展更是现代土壤学研究的热点^[1]。土壤结构是指土壤颗粒(包括不同粒级团聚体)在空间上的排列与组合形式^[2]。土壤结构对土壤质量及其

生态功能的调节、生态系统的稳定等方面都起着重要作用, 如水分入渗、气体交换以及养分循环等过程^[3]。作为土壤结构中的一个重要指标, 土壤结构稳定性是描述土壤在受到外力时保持其团粒结构和孔隙排列

①基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFF1300805)、国家自然科学基金项目(42177338)和中央高校基本科研业务费专项资金项目(2023HHZX001)资助。

* 通讯作者(fbzhang@nwsuaf.edu.cn)

作者简介: 郭正(2000—), 男, 安徽六安人, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀及其效应研究。E-mail: zguo@nwfufu.edu.cn

的能力^[4]。深入研究土壤结构稳定性对于厘清土壤大孔隙中的水力特性和运移过程,阐明结构孔隙度对根区养分影响机制等具有重要意义^[5]。土壤结构稳定性对水力特性的不确定性影响与土壤团聚体被水解的多种物理及物理化学机制有关^[6]。已有众多研究表明可以通过团聚体稳定性来表征土壤结构及其稳定性^[7]。土壤团聚体作为构成土壤结构的基本单元是表征土壤结构、评价土壤质量的重要指标^[8],其粒径组成和稳定性对土壤结构、土壤肥力的影响显著^[9]。团聚体稳定性是指团聚体在抵抗外力作用或受到外部环境变化的影响时保持其原本形态的能力,广泛用于评估土壤对侵蚀的敏感性和易损性^[10]。对团聚体稳定性的深入研究可以为改善土壤结构、提高土壤质量等提供坚实的理论依据。

相比于传统的湿筛法,采用高能水分特性法(High energy moisture characteristic, HEMC)测定土壤团聚体稳定性时可以将土壤团聚体复杂破碎过程中的崩解阶段独立开来,通过对土壤孔径分布微小变化的敏感响应,来比较团聚体稳定性的差异变化^[11]。该法虽操作复杂,耗时较长,但是具有高重现性且灵敏可控,可用于确定具有广泛稳定性水平的干旱和湿润地区的土壤团聚体稳定性^[12]。我国黄土高原近年来开展大规模退耕还林(草)工程措施后,植被演替与恢复过程不断进行。子午岭林区的天然次生林保存较为完好,植被演替在空间上较为完整,主要演替阶段齐全^[13],为团聚体的稳定性变化研究奠定基础。鉴于此,本文选取子午岭林区演替过程中典型群落类型土壤作为研究对象,采用高能水分特性法测定并分析黄土高原子午岭不同植被演替阶段团聚体稳定性的变化特征,明确其发生变化的主要影响因素,为植被演替过程中的土壤质量、土壤结构、土壤抗蚀性及土壤功能的变化提供理论依据和科学支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

子午岭林区(108°20'25"E ~ 108°36'46"E, 35°52'26"N ~ 36°09'12"N)地处甘肃省庆阳市合水县连家砭林场,属典型黄土丘陵沟壑区。该区海拔高度 1 200 ~ 1 700 m,在气候区划上属暖温带半湿润气候,年均气温 7.4 °C,年均降水量 576.7 mm,降雨主要集中在 7、8、9 三个月,无霜期 140 ~ 160 d。试验区土壤多属原生或次生黄土以及局部森林草原植被下发育的灰褐土^[14]。该区植被的演替序列为:从弃耕地先锋群落开始经草地群落、灌木丛林(沙棘林)到先期

森林群落(山杨林),进而到顶级森林群落(辽东栎林)。

1.2 样品采集与处理

于 2021 年 7 月在子午岭连家砭林场进行实地调查,以农田土壤为对照,选取自然演替时间依次约为 30、60、110、160 a 的草地、沙棘、山杨和辽东栎 4 个植被演替阶段的典型样地。其中农田、草地和沙棘取样地为平地,山杨、辽东栎为坡地,针对每种样地分别设置 3 个重复。采用五点采样法,分别采集研究区内 0 ~ 15、15 ~ 30 cm 土层深度的土壤,并将同样地的土样均匀混合。利用四分法收集足够试验用的土样并剔除土样中掺混的植物根系、残体以及碎石块等杂物,装袋后带回实验室。新鲜土样过直径 8 mm 筛网,自然条件下风干。土样风干后取适量土样分别筛分至 2、1 和 0.25 mm,其余土壤进一步筛分得到 2 ~ 1、1 ~ 0.5 和 <0.5 mm 的团聚体样品。

1.3 土壤理化指标测定

利用湿筛法对部分筛分至 8 mm 的风干土样进行处理,测得土壤团聚体水稳性特征几何平均直径(GMD)、平均质量直径(MWD)^[15]。使用马尔文激光粒度仪测定土壤粒径组成,筛分至 2 mm 的土样加入蒸馏水测得土壤有效粒径组成,加入双氧水溶液(蒸馏水:双氧水=4:1)直至土样中有机质处理干净,再加入盐酸溶液(蒸馏水:盐酸=100:1)和 5 mL 六偏磷酸钠溶液(51 g 六偏磷酸钠溶于 1 000 mL 蒸馏水中)测得土壤最终粒径组成。采用筛分至 1 mm 的土样,以土水质量比 1:5 浸提,电导率仪测定土壤电导率(EC),以土水质量比 1:2.5 浸提,pH 计测定 pH。土壤有机碳(SOC)含量采用重铬酸钾氧化-外加加热法测定,土壤全氮(TN)含量采用凯氏定氮法测定,碳酸钙(CaCO₃)含量采用 NaOH 反滴定法测定。

1.4 团聚体结构稳定性的测定

1.4.1 测定原理 HEMC 是一种评估土壤结构和团聚体稳定性的方法^[16-17],该法可以精准把控土壤团聚体样品的湿润处理过程,确保团聚体分解的主要力来源于水化能和截留空气^[4],通过不同基质吸力下可排水孔隙体积的变化来确定土壤团聚体稳定性^[18]。以受控方式湿润处理(快湿和慢湿)团聚体,对在高能量(基质势为 0 ~ 5.0 J/kg)下得到的土壤水分特征曲线的差异进行量化。每个润湿速率下,获取一个团聚体稳定性指标(Structural index, SI)^[19]:

$$SI = \frac{VDP}{h_{modal}} \quad (1)$$

式中:VDP,可排水孔隙的体积,定义为孔隙收缩线和比水容量曲线所约束的面积,采用梯形数值积分计

算； h_{modal} ，模态吸力，为比水容量曲线在峰值处所对应的基质势。

判断团聚体稳定性的直接指标，稳定性比 (Stability ratio, SR)，即快速润湿的 SI_{fast} 和缓慢润湿的 SI_{slow} 值之比：

$$SR = \frac{SI_{\text{fast}}}{SI_{\text{slow}}} \quad (2)$$

在 0 ~ 1 的相对范围内，SR 值越大，表示团聚体越稳定，抵抗因快湿而产生破碎的能力越强；SR 值越小，表示团聚体越不稳定，即快湿越容易破坏团聚体，团聚体孔隙体积或直径发生明显变化^[20]。

1.4.2 测定过程 该法适用粒径为 0.5 ~ 1.0 mm 的团聚体，故取两组筛分后的该粒径团聚体样品约 15 g 平铺在砂芯漏斗内形成约 5 mm 厚的土层^[4, 21]。接着使用蠕动泵以 100 mm/h 和 2 mm/h 的速率对团聚体进行快湿和慢湿处理，根据蠕动泵的速率及进水时间计算出团聚体快湿和慢湿下的饱和含水量 (Saturated water contents, θ_s)，然后对比刻度尺，使凹液面降低 1 ~ 2 cm 以达到 0.1 ~ 0.2 J/kg 增量的基质吸力变化，平衡 2 min 后记录每个基质吸力下团聚体排出的水量，并计算出团聚体相应的残留含水量 (Residual water contents, θ_r)。最后使用改进的 van Genuchten 模型在测定的 HEMC 数据上拟合出快湿和慢湿土样的水分特征曲线以确定团聚体稳定性指标。

1.4.3 指标计算 在指标计算过程中通过非线性回归将修正后的 van Genuchten 模型拟合到实测 HEMC 数据，得出拟合参数^[22]：

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left[1 + (ah)^n \right]^{\left(\frac{1}{n} - 1 \right)} + Ah^2 + Bh + C \quad (3)$$

式中： θ 为重量含水量(g/g)； h 为土壤基质吸力(cm)； θ_s 和 θ_r 是饱和含水量和残留含水量；曲线形状参数 α (cm^{-1}) 和 n (无量纲) 分别为控制水分特征曲线位置和陡度的经验参数；参数 A, B, C 为二次项系数，以改善模型对 HEMC 数据的拟合^[23]。可排水孔隙体积和模态吸力的值由比水容量曲线($d\theta/dh$)通过对公式 (3) 关于 h 求导得到：

$$d\theta/dh = (\theta_s - \theta_r) \left[1 + (ah)^n \right]^{\left(\frac{1}{n} - 1 \right)} \left(\frac{1}{n} \right) (ah)^n \quad (4)$$

$$\left(n / \left\{ h \left[1 + (ah)^n \right] \right\} \right) + 2Ah + B$$

孔隙收缩基线($2Ah+B$)代表由于团聚体收缩而不是孔隙排空引起的水损失率，其与比水容量曲线之

间所约束的面积值即 VDP。公式(4)的一阶导数等于零时计算得到在峰值处的基质吸力即 h_{modal} 。

$$h_{\text{modal}} \approx \frac{1}{\alpha} \left(\frac{n-1}{n} \right)^{1/n} \quad (5)$$

1.5 数据处理与分析

采用 Excel 2023、Origin 2021 对试验数据进行系统整理与作图，利用 SPSS 26.0 对试验数据进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 水分特征曲线拟合

使用改进后的 van Genuchten 模型对测得的 HEMC 数据进行拟合，得到快湿和慢湿处理下表层土壤(0 ~ 15 cm)和亚表层土壤(15 ~ 30 cm)对应的水分特征曲线、比水容量曲线以及孔隙收缩曲线(图 1、2)。不同植被演替阶段土壤快慢湿处理水分特征曲线的形状和团聚体稳定性指数具有一定差异。两种处理方式下山杨、辽东栎土壤的饱和含水量(θ_s)始终高于农田、草地和沙棘土壤，慢湿处理下各植被演替阶段亚表层土壤的 θ_s 相差最小且水分特征曲线差异较小。不同植被演替阶段土壤比水容量曲线形状相似，农田土壤比水容量曲线整体向右下偏移即峰值处的基质吸力最大，农田土壤比水容量曲线和孔隙收缩线约束的积分面积明显小于其他植被阶段。各植被演替阶段慢湿处理的土壤比水容量曲线达到峰值处的基质吸力均小于快湿处理。

2.2 土壤团聚体稳定性

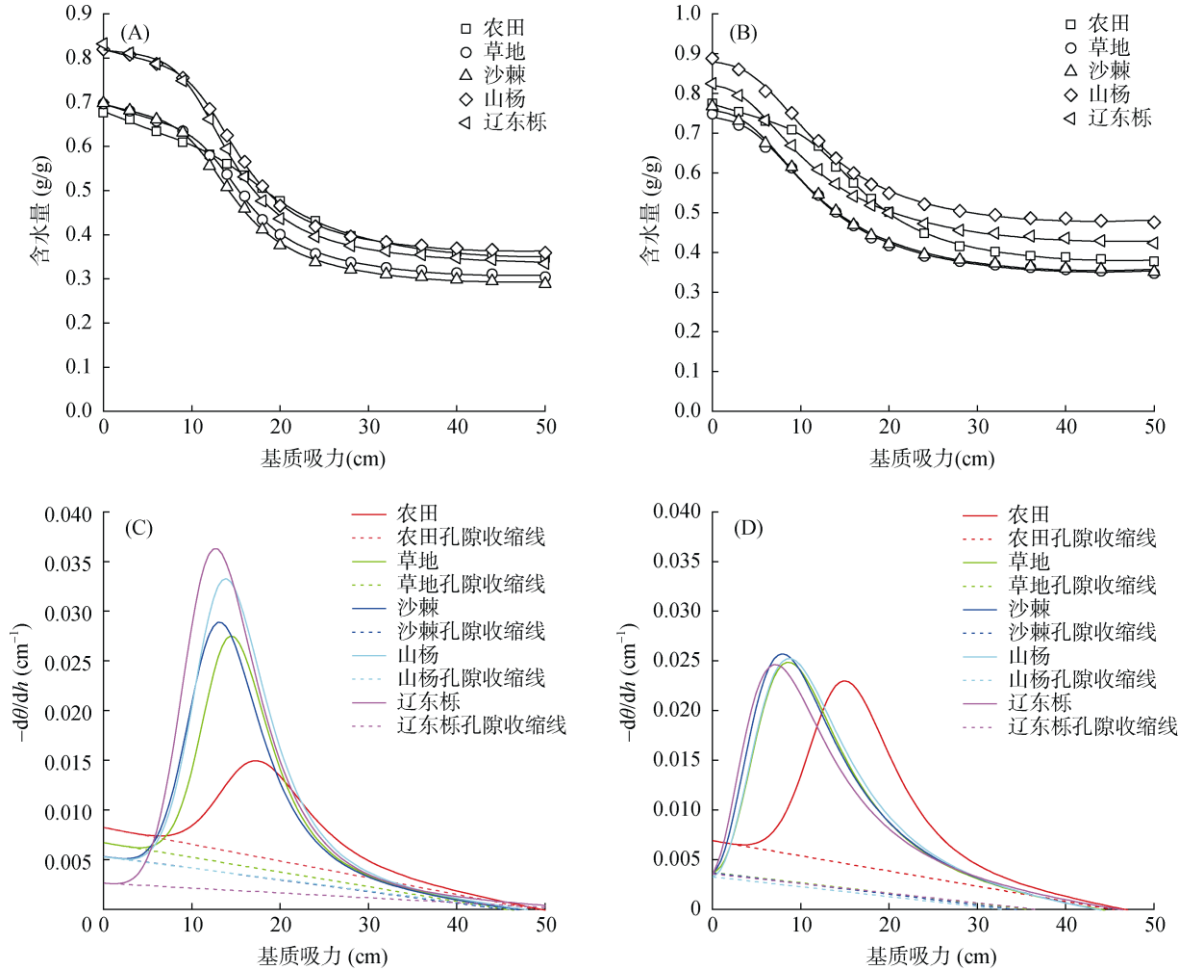
不同植被演替阶段快湿和慢湿处理下的表层(0 ~ 15 cm)和亚表层(15 ~ 30 cm)土壤团聚体稳定性指标如图 3 所示。不同植被演替阶段快慢湿处理的土壤团聚体稳定性指标 SI 值基本呈随演替方向增大，快湿处理的指标 SI 均小于慢湿处理，对应的团聚体稳定性指标 SR 在 0 ~ 1 的相对范围内。辽东栎亚表层土壤的 SR(0.52)虽较低，但 SR 整体上还是随植被演替不断增大，表明随着植被的正向演替团聚体稳定性越好。农田、草地地表覆盖度较低，受降雨击溅作用强烈，同时农田伴随着人工机械扰动等外力作用，均会使团聚体分散成为单个土壤矿物颗粒，导致团聚体稳定性相对较低。农田、辽东栎表层土壤团聚体稳定性好于亚表层，而草地、沙棘和山杨土壤团聚体稳定性却是相反。可能是由于草地、沙棘和山杨上下层土壤有机质含量差异相对较小，其他土壤理化性质会对团聚体稳定性产生较大的影响。

2.3 土壤团聚体稳定性对植被演替的响应

2.3.1 不同植被演替阶段土壤理化性质的变化

土壤主要理化性质的测定结果如图 4 和表 1 所示。整体上,不同植被演替阶段下表层(0~15 cm)和

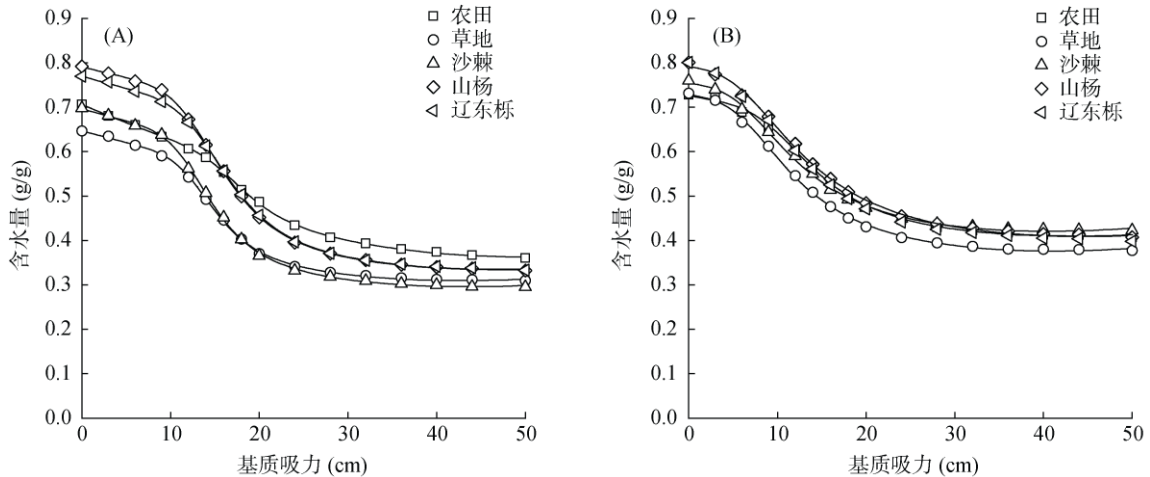
亚表层(15~30 cm)土壤有效粒径粉粒和砂粒含量较高,黏粒含量最低;最终粒径以粉粒含量为主导,黏粒和砂粒含量偏低且相近。不同植被演替阶段表层和亚表层土壤最终粒径差别不大,其中黏粒、粉粒和砂

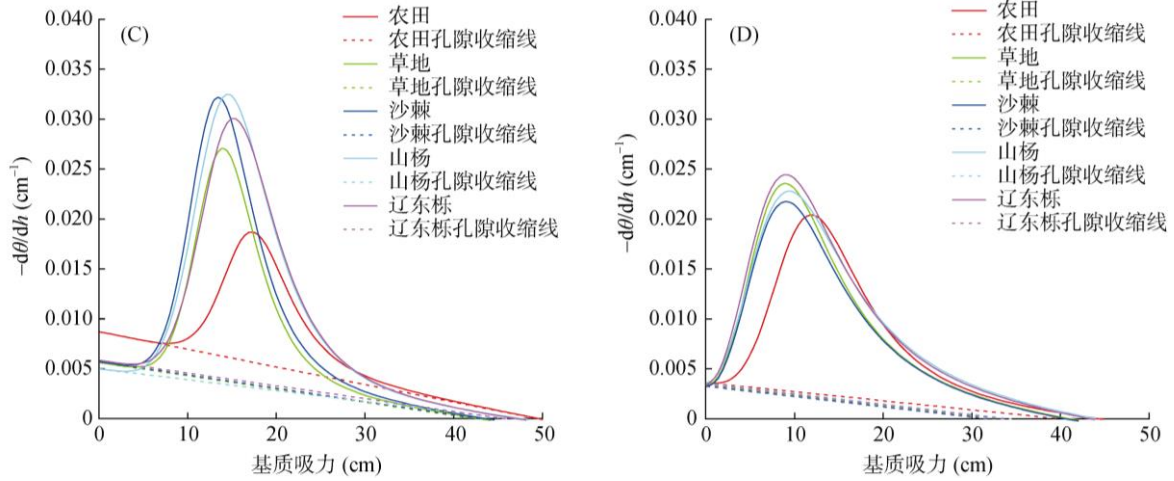


(A、B 分别为快湿处理下和慢湿处理下的水分特征曲线, C、D 分别为 A、B 对应的比水容量曲线和孔隙收缩曲线)

图 1 不同植被演替阶段下表层土壤(0~15 cm)水分特征曲线、比水容量曲线和孔隙收缩曲线

Fig. 1 Water characteristic curves, specific water capacity curves and pore contraction curves of surface soils (0-15 cm) under different vegetation succession stages

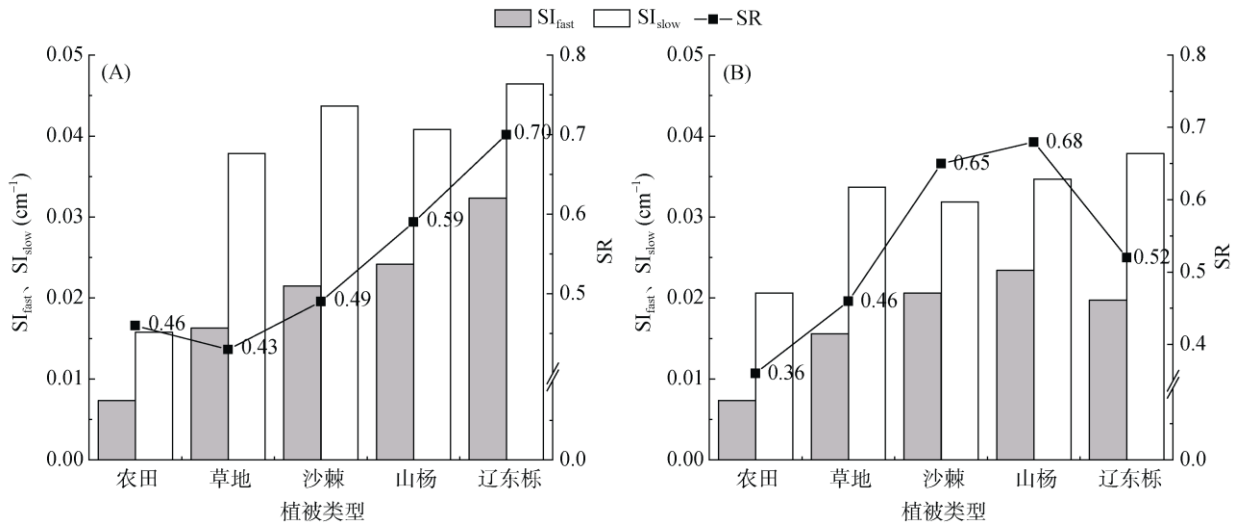




(A、B 分别为快湿处理下和慢湿处理下的水分特征曲线；C、D 分别为 A、B 对应的比水容量曲线和孔隙收缩曲线)

图 2 不同植被演替阶段下亚表层土壤(15 ~ 30 cm)水分特征曲线、比水容量曲线和孔隙收缩曲线

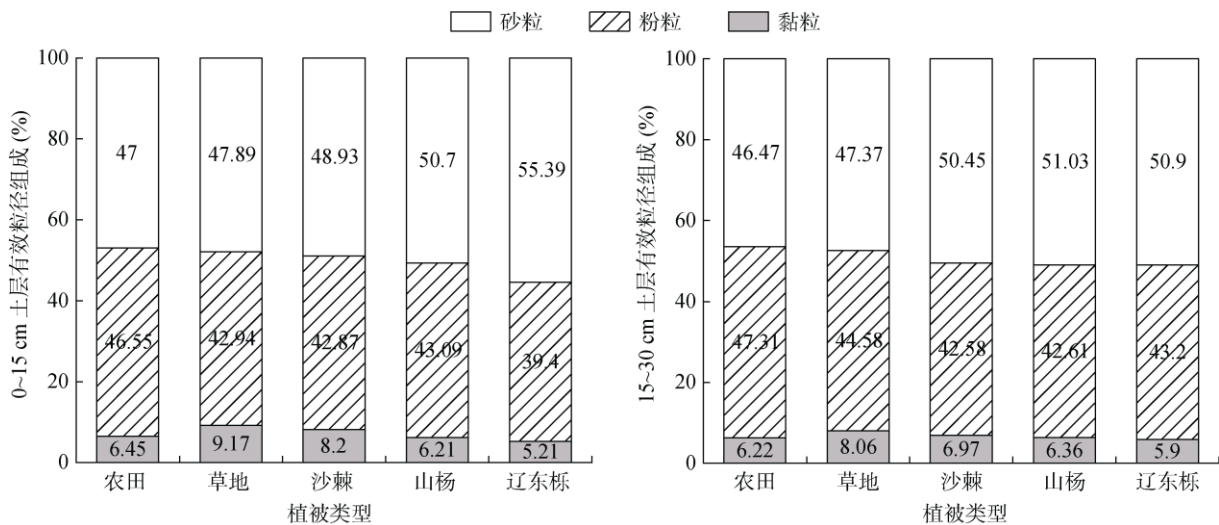
Fig. 2 Water characteristic curves, specific water capacity curves and pore contraction curves of subsurface soils (15 - 30 cm) under different vegetation succession stages



(A. 0 ~ 15 cm 土层; B. 15 ~ 30 cm 土层)

图 3 不同植被演替阶段下土壤团聚体稳定性

Fig. 3 Soil aggregate stabilities under different vegetation succession stages



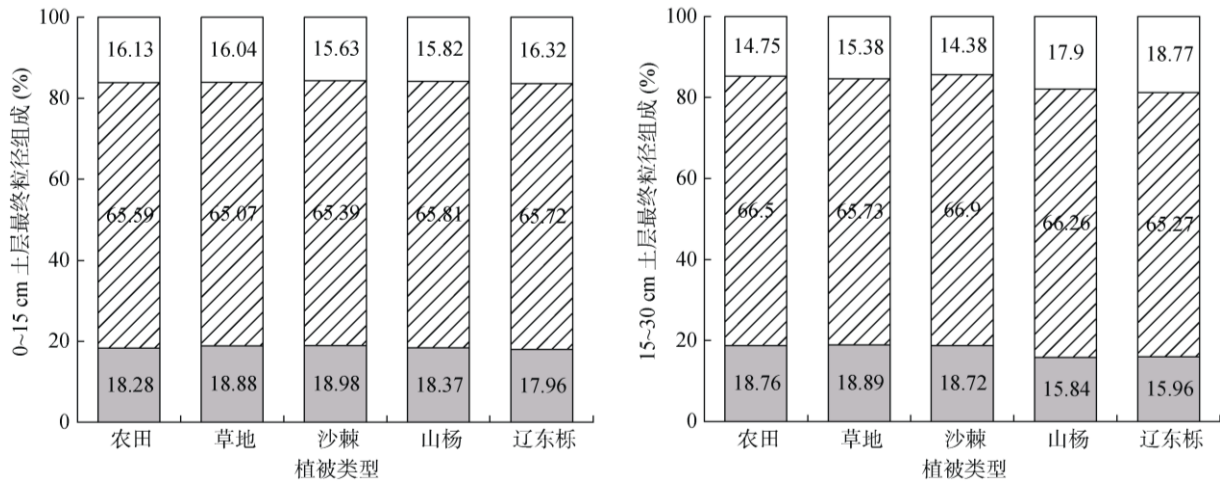


图 4 不同植被演替阶段表层土壤有效粒径和最终粒径组成

Fig. 4 Effective soil particle size compositions and final soil particle size compositions under different vegetation succession stages

表 1 不同植被演替阶段下土壤理化性质

Table 1 Soil physicochemical properties under different vegetation succession stages

植被类型	土层深度 (cm)	EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	pH	SOC (g/kg)	TN (g/kg)	CaCO ₃ (g/kg)	MWD (mm)	GMD (mm)
农田	0 ~ 15	170.00 bA	8.50 aA	12.28 bA	1.19 cA	132.69 aB	1.44 bA	0.58 bA
	15 ~ 30	156.67 bcA	8.64 aA	4.95 bB	0.67 aA	139.76 aA	0.90 bA	0.31 bA
草地	0 ~ 15	171.67 bA	8.50 aA	12.60 bA	1.24 cA	127.72 abB	2.77 aA	1.27 aA
	15 ~ 30	153.67 cB	8.51 bA	7.78 abB	0.80 aB	137.04 aA	1.79 aB	0.69 aB
沙棘	0 ~ 15	165.00 bA	8.27 bB	15.56 bA	1.42 bcA	119.62 bB	2.75 aA	1.28 aA
	15 ~ 30	162.67 bcA	8.51 bA	8.87 aB	0.87 aB	132.12 abA	1.83 aB	0.63 aB
山杨	0 ~ 15	201.50 aA	8.26 bcB	20.15 aA	1.71 abA	110.39 cB	2.29 aA	0.95 aA
	15 ~ 30	176.67 abB	8.40 cA	11.13 aB	1.00 aB	120.42 cA	1.97 aB	0.73 aA
辽东栎	0 ~ 15	204.67 aA	8.16 cB	26.35 aA	2.14 aA	101.30 cB	2.56 aA	1.13 aA
	15 ~ 30	188.67 aA	8.51 bA	8.01 abB	0.81 aB	123.74 bcA	2.06 aB	0.75 aB

注：表中不同小写字母表示同一土层深度不同植被演替阶段之间差异显著 ($P < 0.05$)，不同大写字母表示同一植被演替阶段不同土层深度之间差异显著 ($P < 0.05$)。

粒含量范围分别在 15.84% ~ 18.98%、65.07% ~ 66.90% 和 14.38% ~ 18.77%。有效粒径差别相对较大，其中黏粒、粉粒和砂粒含量范围分别在 5.21% ~ 9.17%、39.4% ~ 47.31% 和 46.47% ~ 55.39%。不同植被下有效砂粒差异最大，有效粉粒、黏粒差异较小。整体上有有效砂粒随着植被演替不断增加，而有效粉粒、黏粒基本随植被演替不断减少。土壤颗粒之间团聚作用形成的部分微团聚体和大团聚体会促进土壤有效砂粒含量增加。

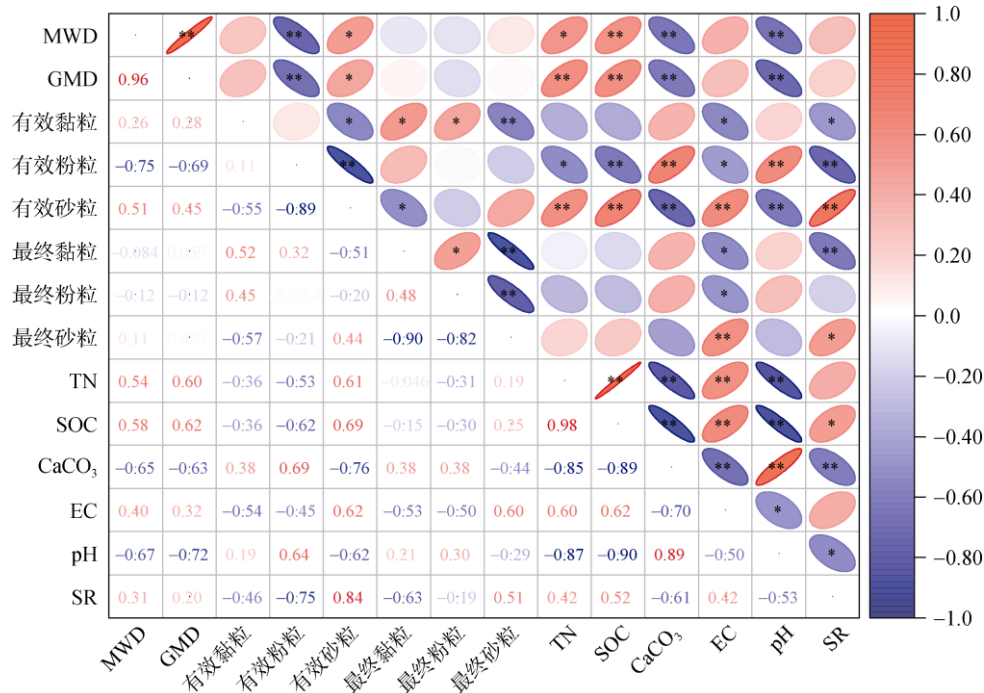
土壤 SOC 含量随植被正向演替不断增加，各植被阶段表层和亚表层土壤 SOC 含量存在显著差异，表层土壤 SOC 含量显著高于亚表层土壤 ($P < 0.05$)；辽东栎表层土壤的 SOC 含量最高，农田亚表层土壤 SOC 含量最低。总体上各植被演替阶段土壤 TN 含量与 SOC 特征一致，土壤 TN 含量随植被演替不断增加。除山杨和辽东栎表层土壤外各植被演替阶段土壤

EC 均在 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 以下。表层土壤 CaCO₃ 含量随植被演替不断减小，且均显著低于亚表层土壤 ($P < 0.05$)。各植被演替阶段表层土壤的 GMD、MWD 均高于亚表层土壤，其中只有农田土壤团聚体水稳性在两个土层间没有显著差异。

2.3.2 土壤团聚体稳定性对土壤理化性质变化的响应 不同植被演替阶段土壤团聚体稳定性指标 (SR) 与部分土壤理化性质具有显著相关性 (图 5)。其中，SR 与有效砂粒呈极显著正相关 ($P < 0.01$)，与最终砂粒和 SOC 呈显著正相关 ($P < 0.05$)，与 TN 和 EC 之间存在正相关关系。SR 与有效粉粒、最终黏粒和 CaCO₃ 呈极显著负相关 ($P < 0.01$)，与有效黏粒和 pH 呈显著负相关 ($P < 0.05$)，与最终粉粒存在负相关关系。有效砂粒是团聚体稳定性指标 SR 响应程度最大的因子。土壤矿物颗粒是团聚体形成的基础，与有机

质之间存在强烈的吸附、结合作用,进而影响土壤团聚体稳定性。作为团聚体稳定性的主要影响因子,SOC 与土壤团聚体水稳性 MWD、GMD 呈正相关。

值得注意的是,团聚体稳定性指标 SR 与土壤理化因子之间的正负响应趋势同团聚体水稳性特征响应结果基本相同,但相关程度有所差异。



(*、**分别表示相关性达 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 显著水平)

图 5 不同植被演替阶段土壤理化性质与团聚体稳定性的相关性

Fig. 5 Correlation between soil physicochemical properties and aggregate stability under different vegetation succession

3 讨论

本研究采用高能水分特性法测定黄土高原子午岭不同植被演替阶段土壤团聚体稳定性,探究其变化特征,明确其发生变化的主要影响因素。团聚体稳定性用指标稳定性比(SR)衡量,在相对范围内其值越高代表团聚体稳定性越好。研究发现土壤团聚体稳定性整体上随着植被演替逐渐增强。这与许多研究结果一致,彭新华等^[24]的研究说明植被恢复可以促进土壤团聚体结构形成及其稳定性的提高,赵世伟等^[25]研究说明黄土高原宁南山区沙棘的团聚体稳定性要高于农田、荒草地。植被演替为团聚体的形成提供良好的条件,不断丰富的植物根系及根际微生物产生的菌丝均可以有效包裹团聚体;同时演替促进土壤有机物的积累,导致土壤颗粒间范德华引力显著增强,从而提升了团聚体稳定性及抗溅蚀分离能力^[26]。需要注意的是,本研究还发现表层土壤团聚体稳定性不完全高于亚表层。草地、沙棘和山杨表层土壤有机碳含量虽高于亚表层,但表层土壤团聚体稳定性却较弱。可能是有机碳对土壤团聚体稳定性的促进作用在达到一定阈值后趋于稳定^[27],即使在较高的有机碳含量

水平下,若土壤黏粒含量不足,也会影响团聚体的形成及稳定^[28]。有机碳均衡及阈值效应下,其他的土壤理化性质对团聚体稳定性的影响可能会凸显出来。

土壤团聚体稳定性的影响因素众多,自然条件下主要取决于土壤质地、气候条件和植被盖度等^[29-30]。本研究发现土壤团聚体稳定性与有机碳之间存在较强的正相关关系。这与 Six 等^[31]的研究结果一致,有机物的存在会使微团聚体之间的黏结力和扩张强度增强,促进团聚体稳定性的提高。除有机碳外,团聚体稳定性可能还受其他因素影响,如 CaCO₃除了作为低黏粒钙质土壤中的胶结物质,其淀积和转化过程还会通过影响土壤酸碱度来间接影响团聚体稳定性^[32]。本研究发现土壤黏粒与土壤有机碳、团聚体稳定性之间均存在负相关关系。这与 Burke 等^[33]研究得出土壤黏粒含量与有机碳含量呈显著正相关的结果不一致,而 Monreal 等^[34]研究却发现土壤有机碳与总黏粒含量呈负相关。黏粒含量较少且差异不大,主要是因为除黏粒含量外,黏土类型对土壤有机质的固持同样重要^[35]。有效粉粒与团聚体稳定性的负相关程度较高,原因可能是团聚体经历孔隙破碎后接近于粉

粒颗粒大小^[32], 粉粒颗粒会影响土壤团聚体之间的透气孔隙, 同时粉粒比表面积较黏粒小, 在土壤有机质吸附以及土壤颗粒聚集过程中的促进效果较差。有效砂粒、最终砂粒与团聚体稳定性呈显著正相关, 是因为砂粒颗粒较大, 包含有部分团聚体或微团聚体, 砂粒含量的增加基本是土壤团聚体形成的结果; 同时少量的铁氧化物的吸附可显著增加砂粒的表面积, 形成的铁氧化物“涂层”对较大矿物颗粒和有机质之间的相互作用有促进效果^[35]。

4 结论

1) 随着植被演替的进行, 土壤团聚体稳定性不断增强。农田、辽东栎表层土壤团聚体稳定性高于亚表层, 草地、沙棘和山杨相反。

2) 本研究中砂粒、土壤有机碳、有效粉粒、最终黏粒与土壤团聚体稳定性存在较大的响应程度, 其中有效砂粒为土壤团聚体稳定性最主要的响应因子。

目前, 关于土壤团聚体稳定性的研究主要集中在不同条件下的变化特征及与土壤理化指标之间的相关关系, 仍缺乏基于大量的多维度数据分析土壤团聚体稳定性与关键因子的定量关系的研究。同时, 团聚体稳定性从与土壤抗蚀能力响应关系到其定量指标转变有待进一步深化, 是否可以将其用以表征土壤可蚀性, 预测土壤侵蚀强度, 进而引入土壤侵蚀模型是一个重要的研究方向。

参考文献:

- [1] 陈睿山, 郭晓娜, 熊波, 等. 气候变化、土地退化和粮食安全: 关联机制与解决途径[J]. 生态学报, 2021, 41(7): 2918–2929.
- [2] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils[J]. *Journal of Soil Science*, 1982, 33(2): 141–163.
- [3] Vogel H J, Balseiro-Romero M, Kravchenko A, et al. A holistic perspective on soil architecture is needed as a key to soil functions[J]. *European Journal of Soil Science*, 2022, 73(1): e13152.
- [4] Mamedov A I, Levy G J. High energy moisture characteristics: Linking between some soil physical processes and structure stability[M]//*Advances in agricultural systems modeling*. Madison, WI, USA: American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, 2015: 41–74.
- [5] Ahuja L R, Ma L W, Timlin D J. Trans-disciplinary soil physics research critical to synthesis and modeling of agricultural systems[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70(2): 311–326.
- [6] Le Bissonnais Y. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. theory and methodology[J]. *European Journal of Soil Science*, 1996, 47(4): 425–437.
- [7] Strudley M W, Green T R, Ascough J C. Tillage effects on soil hydraulic properties in space and time: State of the science[J]. *Soil and Tillage Research*, 2008, 99(1): 4–48.
- [8] 张旭冉, 张卫青. 土壤团聚体研究进展[J]. *北方园艺*, 2020(21): 131–137.
- [9] Misra R K, Teixeira P C. The sensitivity of erosion and erodibility of forest soils to structure and strength[J]. *Soil and Tillage Research*, 2001, 59(1/2): 81–93.
- [10] Nciizah A D, Wakindiki I I C. Physical indicators of soil erosion, aggregate stability and erodibility[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2015, 61(6): 827–842.
- [11] Levy G J, Mamedov A I, Goldstein D. Sodicity and water quality effects on slaking of aggregates from semi-arid soils[J]. *Soil Science*, 2003, 168(8): 552–562.
- [12] Gholoubi A, Emami H, Caldwell T. Deforestation effects on soil aggregate stability quantified by the high energy moisture characteristic method[J]. *Geoderma*, 2019, 355: 113919.
- [13] 邹厚远, 刘国彬, 王晗生. 子午岭林区北部近 50 年植被的变化发展[J]. *西北植物学报*, 2002, 22(1): 1–8.
- [14] 马任甜, 胡斐南, 刘婧芳, 等. 黄土高原植被恢复过程中土壤表面电化学性质演变特征[J]. *土壤学报*, 2020, 57(2): 392–402.
- [15] 吕贻忠, 周虎, 杨志臣, 等. 保护性耕作对华北平原土壤团聚体特征的影响[J]. *中国农业科学*, 2007, 40(9): 1973–1979.
- [16] Childs E C. Stability of clay soils[J]. *Soil Science*, 1942, 53: 79–92.
- [17] 黄悦, 张凤宝, 高晶霞, 等. 基于高能水分特性法的土壤团聚体结构稳定性研究进展[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(6): 431–437, 443.
- [18] Mamedov A I, Wagner L E, Huang C, et al. Polyacrylamide effects on aggregate and structure stability of soils with different clay mineralogy[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2010, 74(5): 1720–1732.
- [19] Collis-George N, Figueroa B S. The use of high energy moisture characteristic to assess soil stability[J]. *Soil Research*, 1984, 22(3): 349.
- [20] Mamedov A I, Beckmann S, Huang C, et al. Aggregate stability as affected by polyacrylamide molecular weight, soil texture, and water quality[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2007, 71(6): 1909–1918.
- [21] Levy G J, Mamedov A I. High-energy-moisture-characteristic aggregate stability as a predictor for seal formation[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66(5): 1603–1609.
- [22] Hosseini F, Mosaddeghi M R, Hajabbasi M A, et al. Influence of tall fescue endophyte infection on structural stability as quantified by high energy moisture

- characteristic in a range of soils[J]. *Geoderma*, 2015, 249: 87–99.
- [23] Pierson F B, Mulla D J. An improved method for measuring aggregate stability of a weakly aggregated loessial soil[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1989, 53(6): 1825–1831.
- [24] 彭新华, 张斌, 赵其国. 红壤侵蚀裸地植被恢复及土壤有机碳对团聚体稳定性的影响[J]. *生态学报*, 2003, 23(10): 2176–2183.
- [25] 赵世伟, 苏静, 杨永辉, 等. 宁南黄土丘陵区植被恢复对土壤团聚体稳定性的影响[J]. *水土保持研究*, 2005, 12(3): 27–28, 69.
- [26] 马任甜. 子午岭植被恢复过程中土壤团聚体稳定性提升的内力作用机制[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
- [27] 马帅, 赵世伟, 李婷, 等. 子午岭林区植被自然恢复下土壤剖面团聚体特征研究[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(2): 157–161.
- [28] 王妙倩, 许小明, 王浩嘉, 等. 黄土高原次生林植被演替过程中土壤团聚体动态特征分析[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2023, 51(10): 107–117.
- [29] 王清奎, 汪思龙. 土壤团聚体形成与稳定机制及影响因素[J]. *土壤通报*, 2005, 36(3): 415–421.
- [30] 刘艳, 马茂华, 吴胜军, 等. 干湿交替下土壤团聚体稳定性研究进展与展望[J]. *土壤*, 2018, 50(5): 853–865.
- [31] Six J, Bossuyt H, Degryze S, et al. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics[J]. *Soil and Tillage Research*, 2004, 79(1): 7–31.
- [32] 黄悦. 典型黄绵土团聚体结构稳定性的变化与影响因素研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.
- [33] Burke I C, Yonker C M, Parton W J, et al. Texture, climate, and cultivation effects on soil organic matter content in U.S. grassland soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1989, 53(3): 800–805.
- [34] Monreal C M, Schnitzer M, Schulten H R, et al. Soil organic structures in macro and microaggregates of a cultivated Brown Chernozem[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1995, 27(6): 845–853.
- [35] 刘亚龙, 王萍, 汪景宽. 土壤团聚体的形成和稳定机制: 研究进展与展望[J]. *土壤学报*, 2023, 60(3): 627–643.